

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191290

基于低电压穿越试验的光伏发电系统建模研究

曹斌¹, 刘文焯², 原帅¹, 许冰², 贾焦心³, 颜湘武³

(1. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192; 3. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 为进一步提高光伏发电系统建模准确性, 研究一种充分利用低电压穿越试验数据建立仿真模型的方法。以内蒙古某光伏电站 500 kW 光伏发电单元为研究对象, 首先, 基于典型低电压穿越控制策略, 采用最小二乘估计法完成了逆变器低穿控制环节的参数辨识。其次, 通过对光伏 PV 特性曲线的修正获得光伏阵列的环境参数。最后, 设计了光伏阵列参数计算流程和低穿控制策略测辨流程, 并选取不同电压跌落水平的 4 组实测数据进行测辨。测辨结果代入基于 Simulink 搭建的仿真模型后, 经由仿真与实测数据的对比验证了所提方法的有效性。

关键词: 光伏发电; 参数辨识; 低电压穿越; 最小二乘估计

Modeling of photovoltaic power system based on low voltage ride-through test

CAO Bin¹, LIU Wenzhuo², YUAN Shuai¹, XU Bing², JIA Jiaoxin³, YAN Xiangwu³

(1. Inner Mongolia Power Research Institute, Hohhot 010020, China; 2. National Key Laboratory of Power Grid Security and Energy Saving, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-Grid of Hebei Province (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: In order to improve the modeling accuracy of a PV system, a method of making full use of the LVRT test data to establish a PV model is studied. A 500 kW photovoltaic unit of a photovoltaic power plant in Inner Mongolia is taken as the research object. First, based on the typical LVRT control strategy, the parameter identification of the LVRT control link is completed by the least squares estimation method. Secondly, the environmental parameters of PV arrays are obtained by modifying the PV characteristic curve. Finally, the calculation process of array parameters and the identification process of the LVRT control strategy are designed, and four groups of measured data with different voltage sag levels are selected for identification. After substituting the identification results into the simulation model based on Simulink, the validity of the proposed method is verified by comparing the simulation results with the measured data.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502134).

Key words: photovoltaic power generation; parameter identification; LVRT; least square estimation

0 引言

内蒙古是中国风电与光伏装机容量位居前列的省份, 其新能源发电量已经占到了总发电量的 40% 左右, 新能源电源对内蒙古电网的影响要明显大于其他省份。以光伏发电为例的新能源发电通过电力电子变流器接入电网, 这一特点使其外特性不同于传统同步电源^[1-9], 给电网精确计算造成了一定的困难。对于目前大多数的光伏发电系统, 在稳态运行

时对电网表现为一个功率源, 对电网相关计算的影响尚不明显。但是在电网发生故障时, 由于不同品牌、不同系列的逆变器所采用的低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)策略与参数并不相同, 此时电源会对接入点低电压故障表现出不同的外特性。因此迫切需要切实可行的方法对光伏电站整体建模, 得到其准确的数学模型以满足电网计算需求。

光伏系统建模研究主要有两类: 详细模型和简单模型^[10]。详细模型主要用于: 分析开关频率动力学, 测试新拓扑, 并设计新的控制策略以改善瞬态性能, 特别是低电压穿越(LVRT)能力^[11-13]。另一方面, 提出了各种简化模型^[14]。在 2017 年, 中国发

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(E2018502134);
内蒙古电力公司 2019 年度科技计划项目资助

布了光伏系统的建模指南^[15]。当前, 与 LVRT 要求相关的技术和电网规范一直在不断进步。但模型验证通常是通过仿真案例或实验室的小规模光伏系统进行。文献[16]提出了光伏发电系统的 LVRT 过程统一建模方法, 其通过现场测试结果进行验证, 但未对小功率运行工况进行测试, 有待进一步完善。如何对现场光伏系统在不同工况下的完整 LVRT 过程进行准确地建模仍然是一个重大的技术挑战^[17]。

目前逆变器参数测量方面的文献主要集中于对稳态控制参数的辨析。文献[18]利用最小二乘曲线拟合法, 通过目标函数值判断拟合程度, 修改相关参数反复迭代, 最终求取得到一组较为准确的光伏发电系统参数。文献[19]基于阻尼最小二乘法与状态方程, 通过将阻尼因子加入修正量的计算保证了目标函数下降方向, 最终得到了电流内环控制参数的辨识结果。文献[20]针对逆变器控制中外环耦合导致参数不可唯一辨识的问题, 基于虚拟量测激励法, 提出了一种光伏逆变器控制参数的分步辨识方法, 实现了各参数的独立辨识。文献[21]基于阻尼最小二乘算法, 通过对稳态运行的逆变器施加扰动监测输出变化, 实现了对光伏发电系统 dq 解耦模型的参数辨识。在光伏阵列参数辨识方面, 目前文献采用的智能算法包括: 人工蜂群算法^[22]、人工鱼群和蛙跳算法相结合的混合算法^[23]、混沌粒子群算法^[24]和遗传算法^[25]等。[26-28]等搭建了 LVRT 测试系统, 对光伏系统低穿特性进行了实验研究, 通过对比不同品牌型号逆变器的测试结果提出了一种低电压穿越控制策略识别与参数辨识的方法。除文献[26]外, 上述文献的参数测试方法只是通过实验室的仿真案例或小规模光伏系统来验证。

尽管当前关于光伏发电系统稳态参数辨识与低电压穿越控制策略的研究已经比较完善, 但是少有文献在光伏发电系统的低穿策略与参数辨识上进行比较完善的阐述。鉴于这一现状, 本文基于最小二乘估计与典型低电压穿越控制策略, 提出一种光伏发电系统的低电压穿越控制策略辨识方法, 并利用现场试验数据进行验证, 仿真与试验结果对比表明所提方法的有效性。

1 原理与方法

1.1 光伏发电系统结构

本文研究对象如图 1 所示, 为单级集中式工频隔离型结构。基本工作方式多片光伏面板串联形成一个光伏组串, 再由多个组串并联接入一台大功率

逆变器进行电能变换, 最后两台大功率逆变器接至一台三绕组变压器进行升压与隔离, 将电能送入电网。

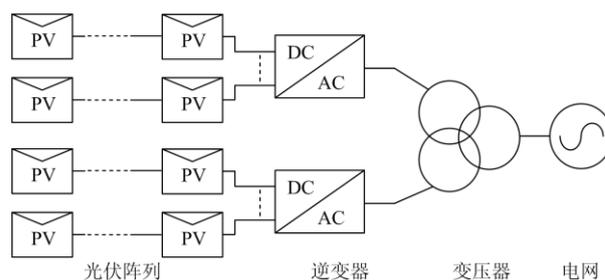


图 1 光伏发电系统主电路拓扑

Fig. 1 Topology of photovoltaic power system main circuit

典型光伏逆变器控制策略为图 2 所示的三环结构。其中外环负责最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT), 中环控制直流电压, 内环调节输入电网的有功无功电流及电流的解耦, 电压、电流控制器通常为 PI 控制器。采用这种控制方式的逆变器在正常运行时, 通过最大功率跟踪算法与矢量控制使逆变器工作在单位功率因数下, 将光伏阵列产生的有功功率全部输送至电网, 以求发电效益最大化。

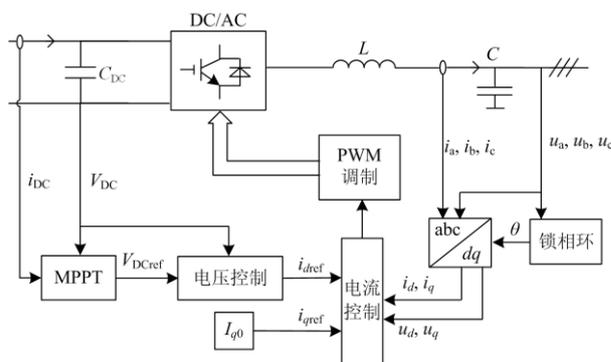


图 2 逆变器控制结构

Fig. 2 Structure of inverter control

1.2 低电压穿越控制策略

在国家电网公司发布的《光伏电站接入电力系统技术规定》中, 明确提出了对大型光伏电站遇到低电压故障时不脱网持续运行能力的要求, 其应当满足的运行范围如图 3 所示^[29]。

同时, “规定”中还对经由高电压等级接入电网的光伏电站在电网故障期间的出力作出了要求: 电站需要在故障期间为电网提供动态无功支持, 以协助故障影响范围内的电压恢复。目前典型的低穿控制策略, 是在优先保证输出根据电压跌落深度算出

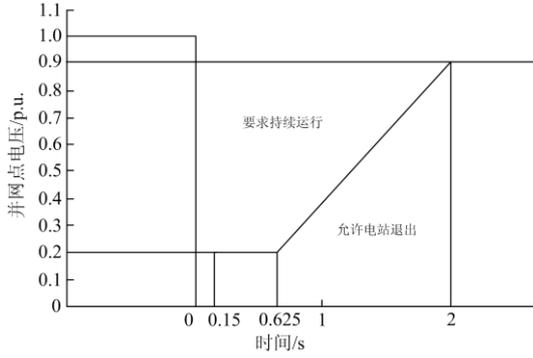


图3 光伏电站低电压穿越能力要求

Fig. 3 Requirement of photovoltaic power plant LVRT capability

的无功电流的前提下，控制逆变器在总电流限制范围内兼顾有功电流的输出。计及低电压穿越无功电流基础值、故障前无功电流值、电压跌落深度、无功电流最大值，故障期间无功电流参考值 I_{q_ref} 的计算公式为

$$I_{q_ref} = \min(K_{qU}(0.9-U) + K_{qI}I_{q0} + I_q^*, I_{q_max}) \quad (1)$$

式中： K_{qU} 为无功电流支撑系数； U 为并网点电压幅值的标幺值； I_{q0} 为故障前无功电流值； K_{qI} 为 I_{q0} 相关系数； I_q^* 为低穿无功电流基础值； I_{q_max} 为无功电流的最大值。

故障期间输出的有功电流值根据不同的计算方式可以大致分为以下三种。

$$I_{d_ref} = \begin{cases} \min(P_0/U, I_{max} - |I_q|) \\ \min(P_0/U, \sqrt{I_{max}^2 - I_q^2}) \\ K_{dI}I_{d0} + K_{dU}U + I_d^* \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_0 为故障前输出的有功功率； I_{max} 为逆变器电流最大值； I_{d0} 为故障前的有功电流值； K_{dI} 为 I_d 与 I_{d0} 之间的比例系数； K_{dU} 为 I_d 与 U 之间的比例系数； I_d^* 为低穿有功电流基础值。

在低电压故障发生的瞬间，由于并网点电压 U 降低而有功电流 I_d 还未变化，导致此时送入电网的有功功率 P 下降。差额功率对电容充电使得直流母线电压上升，光伏阵列运行点由最大功率点转移至图4中PV曲线的A点。

此时闭锁最大功率跟踪算法，根据低穿期间有功电流参考值 I_{d_ref} 与并网点电压 U ，计算出注入电网的有功功率 P_{LV} ，便可以确定光伏阵列所需发出的功率，进而调节直流侧电压使有功功率保持平衡。

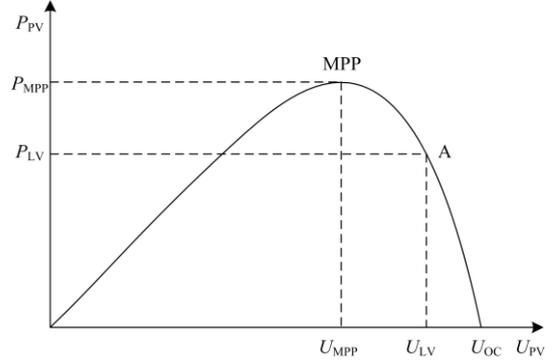


图4 变功率跟踪示意图

Fig. 4 Variable power point tracking diagram

1.3 最小二乘估计法

在求解多元线性模型的回归参数时，最小二乘估计法是最常用的方法。对于含有 $p+1$ 个待求解参数的多元线性回归模型，其可以表示为

$$Y_{n \times 1} = \beta_0 + \beta_1 X_{1, n \times 1} + \dots + \beta_p X_{p, n \times 1} + \varepsilon_{n \times 1} \quad (3)$$

式中： $Y_{n \times 1}$ 为响应向量； $X_{i, n \times 1} (i=1, 2, \dots, p)$ 为自变量向量； β_0 为待求解常数； β_i 为 $X_{i, n \times 1}$ 对应的待求解回归系数； $\varepsilon_{n \times 1}$ 为随机误差向量。

随机误差平方和见式(4)。

$$Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p) = \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^2 \quad (4)$$

通过寻找参数 β_i 的估计值 $\hat{\beta}_i$ 使其值最小，即可得到该模型待求解参数对应的最小二乘估计结果。

估计值向量的计算方法见式(5)。

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y_{n \times 1} \quad (5)$$

式中， $X = [X_{1, n \times 1}, X_{2, n \times 1}, \dots, X_{p, n \times 1}]$ 为自变量矩阵。

对于无功电流参考值的计算公式，针对其未达到最大限值的情况，可以写作

$$\begin{pmatrix} I_{q_ref,1} \\ I_{q_ref,2} \\ \vdots \\ I_{q_ref,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9-U_1 & I_{q0,1} & 1 \\ 0.9-U_2 & I_{q0,2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.9-U_n & I_{q0,n} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{qU} \\ K_{qI} \\ I_q^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中，下标 $1, 2, \dots, n$ 代表不同试验工况。

式(6)可以简化表示为 $Y_q = X_q \beta_q$ 。

对于有功电流参考值公式中的第三种计算方式，可以写作

$$\begin{pmatrix} I_{d_ref,1} \\ I_{d_ref,2} \\ \vdots \\ I_{d_ref,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{d0,1} & U_1 & 1 \\ I_{d0,2} & U_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{d0,n} & U_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{dI} \\ K_{dU} \\ I_d^* \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(7)可以简化表示为 $Y_d = X_d \beta_d$ 。

将式(6)、式(7)分别与式(5)的计算方法相结合,即可求解得到无功、有功电流参考值计算公式中的待求解参数 β_q 与 β_d 。

1.4 光伏 PV 特性修正

由于光伏组件输出功率与端电压之间的关系为典型的非线性特征,在实际中往往采用给出关键点参数的形式对光伏组件输出特性进行描述。考虑到光伏组件参数标定时,采用的是标准光照条件 1000 W/m^2 以及温度条件 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此为得到特定工作环境下光伏组件的输出特性,需要对关键点参数进行修正^[29]。首先对光照与温度变化时的偏差进行如下定义。

$$\Delta T = T - T_{\text{ref}} \quad (8)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{\text{ref}}} - 1 \quad (9)$$

式中: T 为光伏组件工作时的实际温度; T_{ref} 为组件关键参数测试时的标准温度; S 为实际光照度; S_{ref} 为组件关键参数测试时的标准光照强度。

根据温度、光照度与光伏组件标准输出参数的偏差,可以计算出温度与光照度变化后的组件修正输出参数。

$$I'_m = I_m \frac{S}{S_{\text{ref}}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (10)$$

$$U'_m = U_m (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \quad (11)$$

式中: I_m 与 I'_m 分别为光伏组件的标称最大功率点电流与修正值; U_m 与 U'_m 分别为光伏组件的标称最大功率点电压与修正值; α 、 γ 为温度修正系数,其中 $\alpha=0.00055 \text{ }^\circ\text{C}$, $\gamma=0.0034 \text{ }^\circ\text{C}$; β 为光照修正系数, $\beta=0.1$ 。

2 仿真模型

试验中仅有一台逆变器并网运行而另一台处于停机状态,因此仅构建单个光伏发电单元仿真模型,仿真模型的拓扑、电路参数与实际系统一致。光伏发电系统现场实物图和拓扑图见图 5。



(a) 实物图

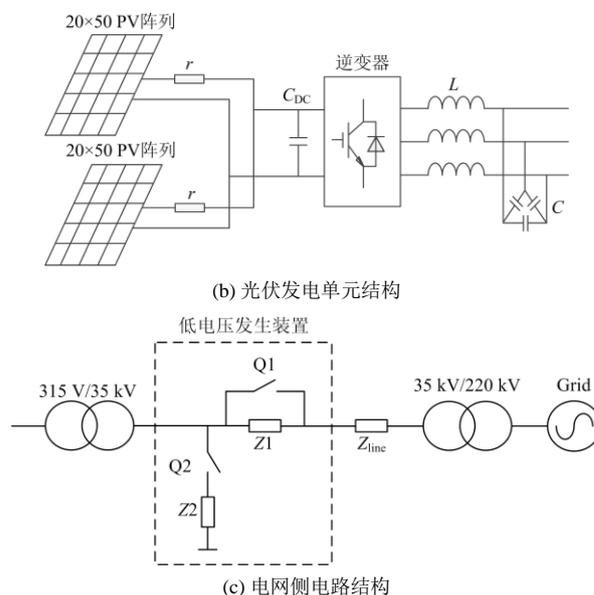


图 5 光伏发电系统实物图和拓扑图

Fig. 5 Physical map and topology of photovoltaic power system

2.1 主电路拓扑与参数

主电路拓扑主要分为光伏阵列、逆变器与所并入电网三部分。对于光伏阵列部分,其结构如图 5(b)所示,采用了直流母线汇流的方式接入集中式逆变器,逆变器接入点位于直流母线的中点,因此该环节采用两个光伏阵列模型模拟两侧的光伏组串,在光伏阵列输出端接入小电阻模拟杂散的线路电阻。光伏组件型号 ZKX-250P-24, 20 块串连形成一个组串,共 100 个组串,容量为 500 kW。

500 kW 逆变器部分由三相全桥电压源型逆变器、直流侧电容与交流侧滤波器构成。直流侧电容的参数为 $C_{\text{DC}}=8\ 820 \mu\text{F}$; 交流侧滤波器的参数分别为 $L=0.1 \text{ mH}$, $C=260 \mu\text{F}$, 并网线电压为 315 V。

光伏发电系统并入电网部分主要由低压-中压升压变压器(额定电压 35/0.315-0.315 kV, 穿越阻抗 6.43%)、低电压发生装置、线路阻抗、中压-高压升压变压器以及大电网构成,如图 5(c)所示。该部分最重要的环节为低电压发生装置,在正常运行时 Q1 开关处于闭合状态, Q2 开关处于分断状态;当需要产生电压故障时,两开关的工作状态反转,利用 Z1、Z2 的分压特性在变压器出口产生所需的低电压工况。

2.2 控制结构

具备低穿功能的光伏逆变器控制方案基于典型三环控制的框图,加入了低穿控制策略及模式切换环节,如图 6 所示。

典型三环控制的逆变器在并网点发生低电压故障时易出现过电流现象, 导致光伏系统被迫退出运行。加入低穿控制策略可以在低穿期间对输出电流进行限制, 保证发电系统的安全并维持其在低穿期间不脱网。具体方法是当并网点电压低于阈值 0.9 p.u. 时, 由常规模式切换为故障模式, 根据式(1)、式(2)进行有功、无功电流控制; 同时使能/去使能 MPPT 环节与直流电压控制环节的能力, 以保证低穿期间的功率平衡, 并减小故障消除后切换至正常控制策略时的功率振荡。

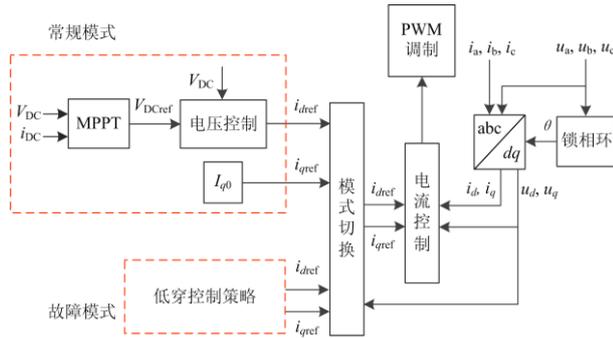


图 6 具备低电压穿越能力的逆变器控制结构

Fig. 6 Block diagram of inverter control with LVRT capability

3 方法验证

基于原理与方法中阐述的低穿控制策略、参数最小二乘估计法以及光伏 PV 特性修正方法, 将研究对象的参数测辨过程分为两部分: 光伏阵列参数计算以及低穿控制策略辨识。

3.1 光伏阵列参数计算

本环节目的是得到对于直流母线或逆变器直流端口等价的光伏阵列仿真参数。考虑到实际中光伏阵列汇集线存在一定的杂散电阻, 图 5 的光伏阵列主电路拓扑进行建模时需要确定三个环境参数: 光照强度、组件工作温度以及线路杂散电阻。

根据运行在最大功率点时的直流母线电压 U_{DC} 、交流侧功率 P_{AC} 以及逆变器效率 η , 可以计算得到直流侧功率 P_{DC} 与直流母线总电流 I_{DC} 。

$$I_{DC} = P_{AC} / (\eta \cdot U_{DC}) \quad (12)$$

仿真中光伏阵列输出特性的计算方式: 端电压为串联组件数目与单个组件电压的乘积, 输出电流为并联组串数与单个组件电流的乘积。因此可得到单侧的直流电流 I'_{DC} 为

$$I'_{DC} = I_{DC} / 2 \quad (13)$$

将计及杂散电阻 r 的光伏阵列端电压 U_{DC} 、单侧直流电流 I'_{DC} 、最大功率点运行时单侧光伏阵列

的标称端电压 U_{mpp} 与输出电流 I_{mpp} 代入式(10)和式(11), 即可以计算得到计及 r 影响的光伏组件平均工作温度 T_r 与平均光照度 S_r , 并可以根据 T_r 得到初步的光伏阵列等效端电压 $U_{PV,r}$ 为

$$U_{PV,r} = U_{mpp} (1 - \lambda \Delta T) \quad (14)$$

式中, λ 为光伏组件的电压-温度系数。

将 U_{DC} 、 U_{PV} 以及 I'_{DC} 结合, 可得到 r 为

$$r = (U_{PV,r} - U_{DC}) / I'_{DC} \quad (15)$$

由于计算温度与光照度时使用的电压 U_{DC} 为光伏阵列经过 r 后的电压, 因此初次计算得到的 S_r 、 T_r 与 r 之间存在耦合关系, 需要利用仿真进行迭代与微调, 使三个参数之间逐渐解耦, 最终可以得到满足实际运行特点的等效光伏阵列模型。计算流程如图 7 所示。

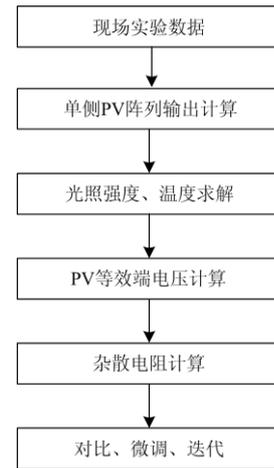


图 7 光伏阵列参数计算流程图

Fig. 7 Flow chart of PV array parameters calculation

3.2 低穿控制策略辨识

本环节目的是得到在低电压故障下对于并网点等价逆变器仿真模型。由于逆变器硬件参数已经确定, 模型对并网点的特性主要取决于控制算法, 这其中主要包含低穿控制与三环控制。

根据现场低电压试验得到的数据, 可以计算出光伏逆变器在低穿期间的有功功率 P 、无功功率 Q 、 dq 轴电流 I_{dq} 、 dq 轴电压 U_{dq} 和直流母线电压 U_{DC} 等数据。在控制策略与参数辨识前, 需要首先将达到限幅值的试验数据剔除, 并挑选出在故障期间成功进入低穿控制模式且达到稳态的试验组。

对于 q 轴电流控制环节的参数辨识, 需要从多组挑选出的试验组中, 提取出低穿期间 q 轴电流参考值 I_{q_ref} 的等价值 I_q 、交流侧电压幅值 U 以及低穿

前的 q 轴电流 I_{q0} , 将提取出的数据结合式(5)与式(6)求解 q 轴控制参数向量 β_q 。

$$\beta_q = (K_{qU}, K_{qI}, I_q^*)^T \quad (16)$$

对于 d 轴电流控制环节的控制方程与参数辨识, 需要根据式(2)分别求取出三种控制策略的参数, 再分别代入仿真中, 以仿真数据与试验数据之间残差平方和最小为准则, 确定控制策略与参数。对于式(2)的前两种策略, 只需要利用故障期间的 dq 轴电流 I_d 、 I_q 计算出电流限值 I_{\max} 即可。第三种策略则需要将多组故障期间 d 轴电流参考值 I_{d_ref} 的等价值 I_d 、电压幅值 U 和故障前的 d 轴电流 I_{d0} 代入式(7), 并结合式(6)求解出 d 轴控制参数向量 β_d 。

$$\beta_d = (K_{dI}, K_{dU}, I_d^*)^T \quad (17)$$

低穿控制策略与参数的辨识流程如图 8 所示。

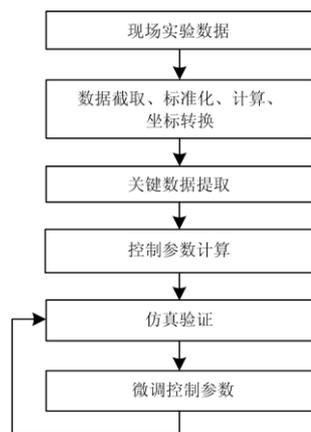


图 8 低穿控制辨识流程图

Fig. 8 Flow chart of identification of LVRT control parameters

3.3 辨识结果与验证

现场试验中考虑了光伏发电单元在高功率运行、低功率运行时, 并网点电压跌落为正常值 0%、20%、35%、60%、90% 的工况, 即针对目标对象的低穿试验共产生了 10 组测试数据。其中 2 组电压跌落深度不足, 未进入低穿模式; 4 组电压跌落时间过短, 故障期间响应未进入稳态; 符合要求的共有 4 组数据。在光伏阵列建模环节, 将对这 4 组数据中的“高功率运行 35% 电压跌落”工况与“高功率运行 20% 电压跌落”工况进行具体分析。而逆变器低穿控制策略辨识环节由于需要多组数据共同得到 1 组结果, 因此本文对仿真结果逼近程度进行分析。

在光伏阵列建模中, “高功率 35% 电压跌落”工况的正常运行点直流电压 $U_{DC.35H}=573.03$ V, 交流侧功率 $P_{AC.35H}=360.04$ kW, 逆变器效率 $\eta=98.8\%$, 此时可以得到 $I_{DC.35H}=635.89$ A。已有数据结合式(8)一

式(11)即可得到光照强度 $S_{r.35H}=763.75$ W/m² 与组件温度 $T_{r.35H}=26.74$ °C; 进而根据式(14)可以计算得到光伏阵列等效端电压 $U_{PV.r.35H}=599.24$ V, 最后解出等效杂散电阻 $r_{r.35H}=0.08$ Ω。将计算的参数代入仿真模型中, 结合低穿期间的直流电压 $U_{DC.35H.LV}=683.82$ V、直流母线功率 $P_{DC.35H.LV}=182.12$ kW, 经过微调得到了最终的光伏阵列环境参数 $S_{35H}=768.19$ W/m²、 $T_{35H}=32.06$ °C、 $r_{35H}=0.06$ Ω。

同理, 对于“高功率 20% 电压跌落”工况, 根据 $U_{DC.20H}=573.06$ V, $P_{AC.20H}=352.14$ kW, $\eta=98.8\%$, 可以得到 $I_{DC.20H}=622.02$ A; 结合式(8)一式(11)即可得到 $S_{r.20H}=748.84$ W/m² 与 $T_{r.20H}=25.78$ °C; 进而根据式(14)可以得到 $U_{PV.r.20H}=601.20$ V, 最后解出 $r_{r.20H}=0.09$ Ω。将初次计算得到的环境参数代入仿真, 结合低穿期间 $U_{DC.20H.LV}=683.82$ V、 $P_{DC.20H.LV}=182.12$ kW, 经过微调得到最终的光伏阵列环境参数 $S_{20H}=751.31$ W/m²、 $T_{20H}=33.52$ °C、 $r_{20H}=0.05$ Ω。

对比上述两组数据, 可以看出 35% 跌落工况求解出的光照度偏高, 这与两种工况下发出功率的相对大小关系一致。对于光照度调整较小但温度和杂散电阻调整较大的现象, 因为光伏输出功率主要受光照强度影响, 组件温度与杂散电阻对其影响有限。因此, 当功率确定后可以基本确定光照强度。而直流母线电压受组件温度、杂散电阻影响较为明显, 受光照度影响较小, 初始求解得到的组件温度与杂散电阻之间的耦合较为紧密, 导致最终结果与初始计算结果有一定的偏差。全部 4 组试验数据的计算结果与仿真调试结果见表 1。

表 1 光伏阵列环境参数计算结果与调试结果

Table 1 Calculated and simulated environmental parameters of PV arrays

组别	$S_r/(W \cdot m^{-2})$	$S/(W \cdot m^{-2})$	$T_r/^\circ C$	$T/^\circ C$	r_r/Ω	r/Ω
0%L	277.9	274.5	5.5	18.4	0.15	0
0%H	571.4	568.5	20.4	26.5	0.04	0.02
20%H	745.4	751.3	36.9	33.5	0.02	0.05
35%H	762.2	768.2	37.1	32.0	0.02	0.06

由表 1 可知, 除第 1 组的温度、杂散电阻计算结果与调试结果有一定差距外, 其他参数的求解与调试结果均较为一致。第 1 组出现的特殊情况是由于低功率运行时, 光伏组件的常数因子 A 、串联电阻 R_s 以及旁漏电阻 R_{sh} 等参数对输出特性的影响较大, 功率运行时更为明显。但仿真模型中无法修改这些参数, 且组件产品手册中并未给出相应参数的数值, 同时这部分参数的影响也无法在式(10)和式

(11)中体现，最终导致计算结果与调试结果产生了明显的差距。但综合其他参数与组别的结果，可以认为该方法在多数情况下对光伏阵列环境参数的求解是有效的。

根据本节筛选出的 4 组试验数据，将数值按照额定功率 500 kW、额定线电压 315 V 进行标么化，结合前文介绍的辨识方法可以得到表 2 所示的结果。其中， d 、 q 轴电流方程系数最小二乘估计的残差平方和均较小，分别为 0.046 2、0.004 3。

表 2 低穿控制参数辨识结果

Table 2 Identification results of LVRT control parameters

d 轴参数	数值	q 轴参数	数值
K_{dU}	0.627 0	K_{qU}	1.328 6
K_{dI}	0.900 6	K_{qI}	-1.205 2
I_d^*	-0.129 9	I_q^*	-0.042 9
I_{max}/A	1 431.5	I_{qmax}/A	1 431.5

将表 2 参数代入仿真，最终得到标么值下的实际低穿控制策略。

$$\begin{cases} I_{q_ref} = \min[1.33 \times (0.9 - U) - 1.2I_{q0} - 0.043, 1.1] \\ I_{d_ref} = \sqrt{1.1^2 - I_q^2} \end{cases} \quad (18)$$

图 9 展示了 0%H、0%L、20%H、35%H 工况下试验与仿真结果的对比，包括交流 315 侧电压、有功功率、无功功率和直流电压的实测波形(蓝色)和仿真波形(棕色)。可以看出，除 LVRT 恢复阶段外，仿真模型的动态行为与现场结果吻合得很好。

文献[16,23]展示了 LVRT 恢复阶段，有功功率恢复速率慢的情况。本文试验展示了另一种情况即 LVRT 恢复阶段，有功功率恢复快的情况。由试验

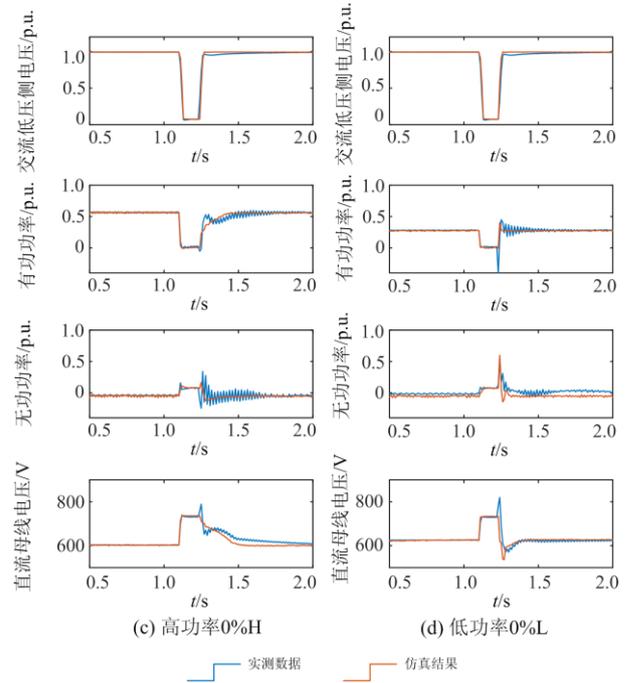
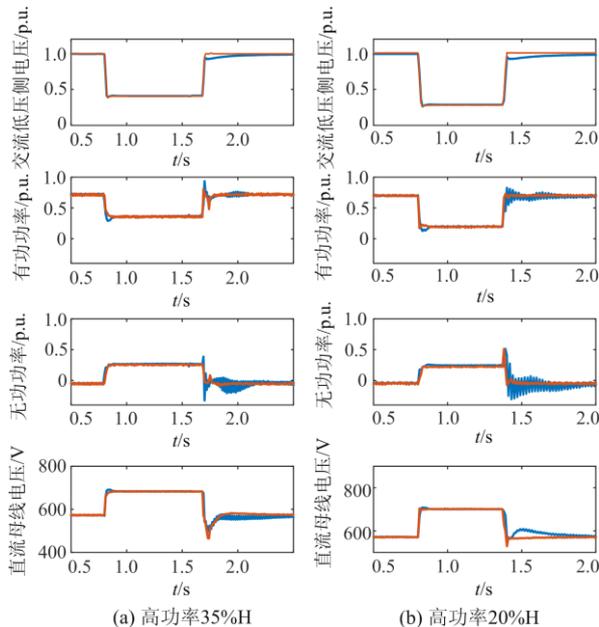


图 9 LVRT 试验与仿真结果的对比

Fig. 9 Comparison between simulation and test results of LVRT

数据可知，有功功率快速恢复会给系统带来负面影响。不仅动态性能恶化，而且在故障恢复阶段功率和电压波形中出现了谐波。

图 10 展示了 $r=0$ 时直流电压试验与仿真波形的对比。可见，35%H、20%H 和 0%H 工况下，在 $r=0$ 时故障状态的直流电压误差均较大；考虑 r 的影响时($r=0.030 \Omega$)，直流电压误差明显减小，对比结果见表 3。0%L 工况下， $r=0.030 \Omega$ 的误差为 3.0 V， $r=0$ 的误差为 -1.3 V；考虑 r 的影响时误差有所增加，主要原因是 0%故障状态的输出有功功率没有精确模拟以及 PV 特性修正方程本身适用于工程近似计算。

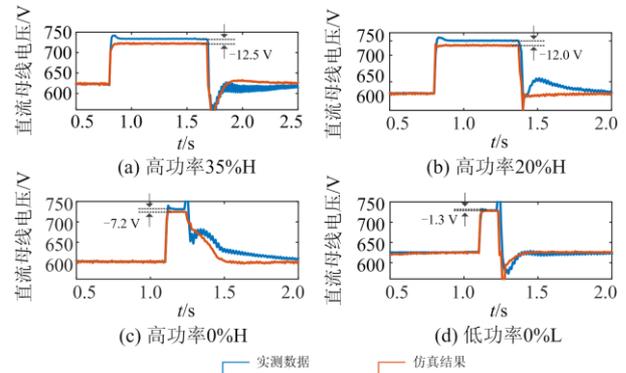


图 10 $r=0$ 时直流电压试验波形与仿真波形的对比

Fig. 10 Comparison between simulation and test results of DC voltage when $r=0$

表 3 LVRT 期间直流电压仿真与试验结果的平均偏差

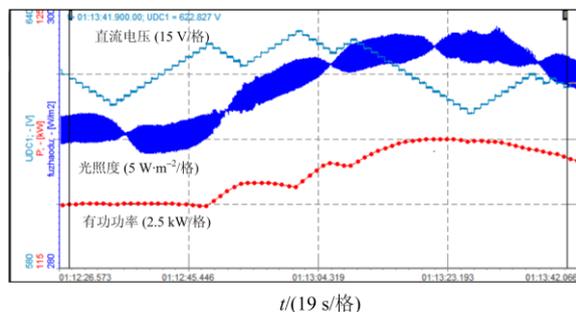
Table 3 Average deviation between simulation and test results of DC voltage during LVRT

线路电阻/ Ω	电压/V			
	35%H	20%H	0%H	0%L
$r=0$	-12.5	-12.0	-7.2	-1.3
$r=0.030$	-1.5	0.8	3.5	3.0

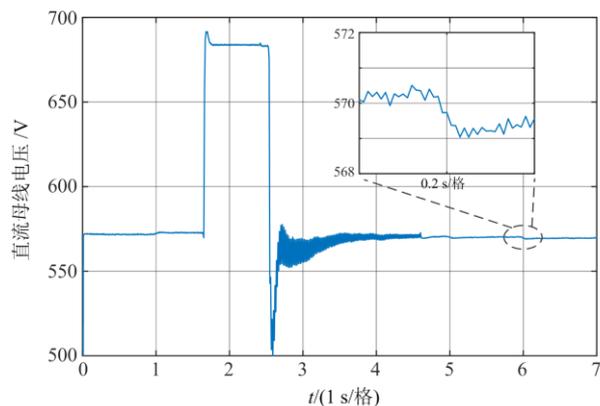
3.4 MPPT 算法及对辨识结果的影响

光照度变化对应 MPPT 过程的现场测试数据如图 11(a), 图中光照度由测量仪器记录, 有功功率为实时计算结果。可见每隔 1 s 直流母线电压有一个相同幅度的电压波动(幅值为 1 V), 说明 MPPT 算法采用的是定步长(1 V)跟踪算法。但无法确定采用的是扰动观测法还是电导增量法, 因为这两种方法具有一致的跟踪结果。

图 11(b)展示了 35% H 工况下 LVRT 前后的 MPPT 过程, 可见在低穿期间未出现 1 V 步长的电压波动, 这是因为低穿期间去使能了 MPPT 环节。因此 MPPT 算法不会对低穿过程造成影响, MPPT 算法对辨识结果的影响具体表现为最大功率点附近 1 V 的直流电压波动对参数辨识的影响。由于最大功率



(a) 光照度变化的 MPPT 过程



(b) LVRT 前后的 MPPT 过程

图 11 MPPT 过程的试验结果

Fig. 11 Test result of MPPT process

点附近 1 V 的直流母线电压波动造成的输出有功波动小于 0.001 p.u.(0.5 kW)可以忽略; 进而 MPPT 算法对低穿控制参数辨识的影响可以忽略。由于 1.4 节的式(8)一式(11)为工程近似计算用的模型, 表 1 的光伏阵列环境参数计算结果本身为近似值, 其微调后才用于仿真模型。即使考虑 1 V 直流电压波动对光伏阵列环境参数计算值的影响, 经过微调后同样能够提高仿真模型精度。

4 结论

本文以内蒙古某光伏电站 500 kW 光伏发电单元为研究对象, 以现场低电压穿越试验的实测数据为基础, 建立了准确的仿真模型, 得出以下结论。

(1) 基于典型的低穿控制策略与最小二乘估计法设计了低穿控制策略的辨识方法与辨识流程; 通过对光伏输出特性曲线的修正, 获得光伏阵列环境参数的方法与计算流程。

(2) 研究发现光伏阵列汇集线路的杂散电阻是精确测辨和建模的关键。当不考虑杂散电阻时直流母线电压仿真计算结果无法与实测数据匹配; 当考虑杂散电阻时直流母线电压仿真计算结果可以较好地与实测数据相吻合。

(3) 仿真与实测数据比对的测辨结果表明, 本文所提两种方法的有效性和合理性为光伏发电系统的建模提供了参考, 并可对所建模型通过接口算法转化到电力系统仿真软件 BPA 中, 用于地区电网全电磁暂态仿真计算。

本文仅对故障期间响应进入稳态的 4 组试验数据进行了分析, 其余 6 组试验数据在电压跌落期间具有动态过程, 如何精确建模有待进一步研究。

参考文献

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A Review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] 王书征, 李先允, 许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 84-91.
WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2019,

- 47(13): 84-91.
- [3] 任自盼, 鲁宝春, 赵亚龙, 等. 光伏虚拟同步发电机建模与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 92-99.
REN Zipan, LU Baochun, ZHAO Yalong, et al. Research on modeling and simulation of photovoltaic virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 92-99.
- [4] SANGWONGWANICH A, YANG Y, SERA D, et al. Analysis and modeling of interharmonics from grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8353-8364.
- [5] SHANG Liqun, ZHU Weiwei, LI Pengwei, et al. Maximum power point tracking of PV system under partial shading conditions through flower pollination algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 400-406. DOI: 10.1186/s41601-018-0111-3.
- [6] 卢斯煜, 周保荣, 饶宏, 等. 高比例光伏发电并网条件下中国远景电源结构探讨[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 39-44.
LU Siyu, ZHOU Baorong, RAO Hong, et al. Research of the prospect of China power generation structure with high proportion of photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 39-44.
- [7] 徐珂, 聂萌, 王洋, 等. OpenDSS 在分布式光伏接入配电网仿真分析中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(11): 88-92.
XU Ke, NIE Meng, WANG Yang, et al. Application of OpenDSS in the application of simulation analysis when distributed PV access to distribution network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(11): 88-92.
- [8] 裴哲义, 丁杰, 李晨, 等. 分布式光伏并网问题分析与建议[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 80-87.
PEI Zheyi, DING Jie, LI Chen, et al. Analysis and suggestion for distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 80-87.
- [9] 黄鸣宇, 祁升龙, 芦翔, 等. 面向配网保护的集分联合馈线自动化控制方法[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2020, 48(5): 49-54.
HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. Centralization and decentralization joint feeder automatic control method oriented to distribution network protection[J]. Henan Normal University: Natural Science Edition, 2020, 48(5): 49-54.
- [10] YONEZAWA R, NODA T, FUKUSHIMA K, et al. Development of detailed and averaged models of large-scale PV power generation systems for electromagnetic transient simulations under grid faults[C] // 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), November 28-December 1, 2016, Melbourne, VIC, Australia
- [11] ZADEH M J Z, FATHI S H. A new approach for photovoltaic arrays modeling and maximum power point estimation in real operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9334-9343.
- [12] MIRHOSSEINI M, POU J, AGELIDIS V G. Single- and two-stage inverter based grid-connected photovoltaic power plants with ride-through capability under grid faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1150-1159.
- [13] FAN Shichao, CHAO Pupu, ZHANG Feifei. Modelling and simulation of the photovoltaic power station considering the LVRT and HVRT[J]. The Journal of Engineering, 2017(13).
- [14] ANA C T, EDUARD B M, MONICA A P, et al. Review of advanced grid requirements for the integration of large scale photovoltaic power plants in the transmission system[J]. Renewable Sustainable Energy Reversion, 2016, 62: 971-987.
- [15] 光伏发电系统建模导则: GB/T32826—2016[S]. 北京: 国家电网公司, 2017.
Guide for modeling photovoltaic power system: GB/T32826—2016[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2017.
- [16] CHAO Pupu, LI Weixing, PENG Simin. A unified modeling method of photovoltaic generation systems under balanced and unbalanced voltage dips[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1764-1774.
- [17] RIAZ S, MARZOOGHI H, VERBIC G, et al. Generic demand model considering the impact of prosumers for future grid scenario analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 819-829.
- [18] 付兵彬, 贾春蓉, 杨昌海, 等. 光伏并网发电系统仿真模型的参数辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 116-120.

- FU Bingbin, JIA Chunrong, YANG Changhai, et al. Parameter identification of distributed photovoltaic power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 116-120.
- [19] 王泽镛. 光伏电站暂态模型及其参数辨识研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
WANG Zedi. Research on photovoltaic power plant transient model and parameter identification[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [20] 金字清, 鞠平, 潘学萍, 等. 光伏逆变器控制参数的分步辨识方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 594-600.
JIN Yuqing, JU Ping, PAN Xueping, et al. A stepwise method to identify controller parameters of photovoltaic inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 594-600.
- [21] 沈欣炜, 郑竞宏, 朱守真, 等. 光伏并网逆变器控制参数的 dq 轴解耦辨识策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 38-43.
SHEN Xinwei, ZHENG Jinghong, ZHU Shouzhen, et al. A dq axis decoupling parameter identification strategy for grid-connected inverter controller of photovoltaic generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 38-43.
- [22] OLIVA D, CUEVAS E, PAJARES G. Parameter identification of solar cells using artificial bee colony optimization[J]. Energy, 2014, 72(7): 93-102.
- [23] 徐岩, 高兆, 朱晓荣. 基于人工鱼群和蛙跳混合算法的光伏阵列多场景参数辨识[J]. 可再生能源, 2018, 36(4): 519-526.
XU Yan, GAO Zhao, ZHU Xiaorong. Multi-scenario parameters identification of photovoltaic array based on hybrid artificial fish swarm and frog leaping algorithm[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36 (4): 519-526.
- [24] 程泽, 董梦男, 杨添剖, 等. 基于自适应混沌粒子群算法的光伏电池模型参数辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 245-252.
CHENG Ze, DONG Mengnan, YANG Tiankai, et al. Extraction of solar cell model parameters based on self-adaptive chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 245-252.
- [25] 查晓锐, 王冰, 黄存荣, 等. 一种基于遗传算法的光伏阵列参数辨识方法[J]. 可再生能源, 2014, 32(8): 1075-1080.
ZHA Xiaorui, WANG Bing, HUANG Cunrong, et al. A parameter identification method of photovoltaic array based on genetic algorithm[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(8): 1075-1080.
- [26] 葛路明, 曲立楠, 陈宁, 等. 光伏逆变器的低电压穿越特性分析与参数测试方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 149-160.
GE Luming, QU Linan, CHEN Ning, et al. Characteristic analysis of low voltage ride-through and parameter test method for photovoltaic inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 149-160.
- [27] 时珊珊, 张双庆, 林小进, 等. 基于不同测试环境的光伏并网逆变器低电压穿越能力验证方法[J]. 电气自动化, 2015, 37(5): 43-46.
SHI Shanshan, ZHANG Shuangqing, LIN Xiaojin, et al. Verification method for PV-connected inverter LVRT capability based on different test environment[J]. Electrical Automation, 2015, 37(5): 43-46.
- [28] 张军军, 郑飞, 黄晶生, 等. 用于光伏低电压穿越测试的电压跌落发生器设计与试验[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 108-113.
ZHANG Junjun, ZHENG Fei, HUANG Jingsheng, et al. Design and test of voltage sag generators for low voltage ride-through test of photovoltaic systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 108-113.
- [29] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 国家电网公司, 2012.
Technical regulations for access of photovoltaic power stations to power systems: GB/T 19964—2012[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2012.

收稿日期: 2019-10-20

作者简介:

曹斌(1981—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统过电压与绝缘配合以及新能源电力系统。

E-mail: caobinbd@163.com

(编辑 许威)